

# Magnetische Eigenschaften von Schmuck- und Edelsteinen

Dr. Siegfried Schmuck

## 1. Einleitung

Die magnetischen Eigenschaften von einigen Materialien sind schon seit Jahrtausenden bekannt. In der Antike berichtete bereits Plinius der Ältere von „magnetischen Kräften“ eines Edelsteins mit dem Namen „*magnes*“ [1]. Es war mehr die anziehende Wirkung auf Eisen und seinesgleichen als die Schönheit dieses Steines, die ihn für Jahrhunderte zu einem begehrten Edelstein machte. In den meisten Fällen wird es sich dabei um den uns heute bekannten Magnetit gehandelt haben.

In einem chinesischen Buch aus der Zeit etwa 70 bis 80 n.Chr. ist die Anziehung einer Nadel durch einen „Magnet“ veröffentlicht [2].

Der Ursprung des Magnetismus liegt im atomaren Bereich eines Stoffes. Verantwortlich dafür ist die Bewegung von geladenen Teilchen (Eigenrotation der Elektronen = Spin, Leitungselektronen, Kernspin der Nukleonen).

Das zum Kernspin gehörende magnetische Moment ist – wegen der bedeutend größeren Masse der Nukleonen – allerdings zu schwach, um einen nennenswerten Beitrag zur Gesamtsuszeptibilität liefern zu können. Daher wird dieser im Folgenden nicht weiter beachtet. Es sei aber darauf hingewiesen, dass das magnetische Moment des Kernes durchaus messbar ist, was in der Medizin bei der Magnetresonanztomografie (MRT) genutzt wird (daher wird das Verfahren auch Kernspintomografie genannt).

Das Zeichen für die Suszeptibilität ist das große griechische *Chi* „ $\chi$ “; die Indizes werden im Text erläutert.

## 2. Arten von Magnetismus

Magnetismus lässt sich in zwei Klassen mit insgesamt 5 Kategorien unterteilen [3].

### 1) Konstante magnetische Suszeptibilität

Alle Stoffe reagieren zu einem gewissen Grad auf magnetische Felder. Im einfachsten Fall konstanter magnetischer Suszeptibilität werden zwei Kategorien unterschieden:

#### a) Diamagnetismus ( $\chi_V < 0$ )

Diamagnetische Stoffe haben das Bestreben, das Magnetfeld aus ihrem Innern zu verdrängen. Sie besitzen kein permanentes magnetisches Dipolmoment. Im Magnetfeld werden jedoch Dipole induziert, die dem äußeren Feld entgegengerichtet sind, so dass das resultierende Feld im Inneren des Materials kleiner als außerhalb ist. Da die Magnetisierung sich also gegen die Richtung eines externen Magnetfeldes einstellt, ist die Suszeptibilität negativ. Im inhomogenen Magnetfeld wird ein diamagnetischer Körper aus dem Bereich großer Feldstärke herausgedrängt. In Materialien deren Atome, Ionen oder Moleküle keine ungepaarten Elektronen besitzen, ist Diamagnetismus die einzige Form von Magnetismus. Diamagnetismus ist in allen Materialien vorhanden, wenn auch meist nicht dominant.

Beispiele für nur diamagnetische Stoffe: Gold, Kupfer, Diamant, Fluorit,...

## b) Paramagnetismus ( $X_V > 0$ )

Paramagnetische Stoffe besitzen permanente magnetische Dipole, die ohne äußeres Magnetfeld aufgrund der thermischen Bewegung über alle Raumrichtungen verteilt sind, so dass die mittlere Magnetisierung nach außen Null beträgt. In einem äußeren Magnetfeld richten sich die atomaren magnetischen Momente parallel zum äußeren Feld aus und verstärken damit das Magnetfeld im Innern des Stoffes. Die Magnetisierung ist also positiv und damit auch die Suszeptibilität. Im inhomogenen Magnetfeld wird ein paramagnetischer Körper in den Bereich großer Feldstärke gezogen. Paramagnetismus kann auch andere Ursachen haben, so liefern z.B. Leitungselektronen von Metallen einen temperaturunabhängigen Beitrag (Pauli-Paramagnetismus).

In Schmuck- und Edelsteinen sind es vor allem paramagnetische Kationen; allen gemeinsam sind ungepaarte Elektronen, die diesen Effekt hervorrufen. Normalerweise ist die Summe dieser Effekte nach außen gleich Null; in einem äußeren magnetischen Feld richten sich diese Elektronen parallel zu den Feldlinien aus und es kommt zu einer kleinen positiven Suszeptibilität, die den Diamagnetismus überlagert.

Beispiele für paramagnetische Stoffe: Aluminium, Sterndiopsid, Almandin, Spessartin, ...

## 2) Suszeptibilität auf Grund magnetischer Ordnungen

### a) Ferromagnetismus ( $X_V \gg 0$ )

Ferromagneten richten ihre magnetischen Momente parallel zum äußeren Magnetfeld aus, tun dies aber in einer stark verstärkenden Weise. Es ist vielfach möglich, einen Ferromagneten komplett zu magnetisieren, so dass die Suszeptibilität einen Sättigungseffekt zeigt.

Beispiele für Ferromagneten:  $\alpha$ -Eisen, Kobalt, Nickel.

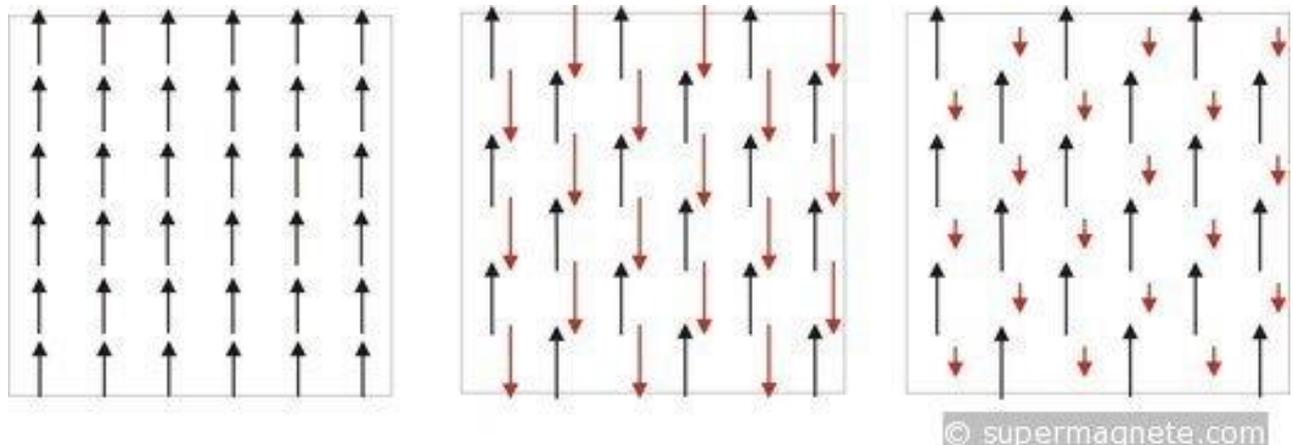


Abbildung 1: Ferromagnetismus - Antiferromagnetismus - Ferrimagnetismus

### b) Ferrimagnetismus ( $X_V \gg 0$ )

Die Suszeptibilität von Ferrimagneten hängt, wie bei den Ferromagneten, von der vorhergehenden Magnetisierung ab. Der Grund für ihr magnetisches Verhalten ist eine antiparallele Ausrichtung von unterschiedlich großen magnetischen Momenten in einem Kristall. Das Kristallgitter eines ferrimagnetischen Stoffes lässt sich durch zwei ineinander gestellte Untergitter beschreiben. Dabei stehen ohne äußeres Magnetfeld die magnetischen Momente der Untergitter genau antiparallel; sie haben aber unterschiedlichen Betrag, so dass ohne angelegtes Feld eine spontane Magnetisierung vorhanden ist. Die Magnetisierungskurve ist ähnlich zu der von Ferromagneten, aber mit wesentlich niedrigerer Sättigungsmagnetisierung.

Beispiel für ein ferrimagnetisches Material: Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

c) Antiferromagnetismus ( $\chi_V \sim 0$  bis  $> 0$ )

Antiferromagnete sind magnetisch anisotrop, d. h. ihre Suszeptibilität hängt von der Orientierung des Festkörpers im Magnetfeld ab. Liegt das äußere Magnetfeld in einer Ebene mit den elementaren magnetischen Momenten, so ist der Zusammenhang zwischen Suszeptibilität und Temperatur näherungsweise linear. Steht das Magnetfeld senkrecht zu jener Ebene, so ist die Suszeptibilität näherungsweise temperaturunabhängig. Das Kristallgitter eines antiferromagnetischen Stoffes lässt sich durch zwei ineinander gestellte Untergitter beschreiben. Dabei stehen ohne äußeres Magnetfeld die magnetischen Momente der Untergitter genau antiparallel; sie haben aber gleichen Betrag, so dass ohne angelegtes Feld die Magnetisierung verschwindet. Beispiele für Antiferromagnete: Metallverbindungen mit eingebauten paramagnetischen Ionen wie MnO oder MnF<sub>2</sub> (spielt in der Gemmologie so gut wie keine Rolle).

### 3. Theoretische Grundlagen

Vor der Beschreibung von Experimenten über das magnetische Verhalten von Schmuck- und Edelsteinen benötigt man noch einen kurzen Überblick über die Gesetzmäßigkeit der Wirkung von Magnetismus.

- Volumenssuszeptibilität  $X_V$

Gelangt ein Stoff in ein Magnetfeld, so ist entsprechend des oben angeführten Magnetismus eine Wechselwirkung dieses Stoffes mit dem angelegten Magnetfeld feststellbar. Die Wechselwirkung ist direkt proportional dem äußeren Magnetfeld, die Volumenssuszeptibilität  $X_V$  ist der Proportionalitätsfaktor und eine stoffspezifische Größe.

Gleichung 1  $\vec{M} = X_V \cdot \vec{H}$  wobei:  $\vec{M}$  = Magnetisierung, Größe der Wechselwirkung  
 $\vec{H}$  = magnetische Feldstärke  
 $X_V$  = Volumenssuszeptibilität

Mit anderen Worten: Je größer das äußere Magnetfeld, umso stärker ist die Wechselwirkung des Stoffes mit diesem Magnetfeld.

Die Volumenssuszeptibilität  $X_V$  hat keine Einheit.

Die Größe reicht von  $\sim -1 \cdot 10^{-4}$  bis nahezu Null (diamagnetische Stoffe),  
 $\sim +1 \cdot 10^{-5}$  bis  $\sim +1 \cdot 10^{-1}$  (paramagnetische Stoffe)  
bis größer als 1 (ferromagnetische Stoffe).

Aufzupassen ist besonders bei älterem Tabellenwerk, da hier häufig das cgs-System verwendet wurde. Um vom cgs-System in das SI-System umzurechnen ist mit  $4\pi$  zu multiplizieren.

Gleichung 2  $X_V(SI) = 4 \cdot \pi \cdot X_V(cgs)$  wobei:  $X_V(SI)$  = Volumenssuszeptibilität im SI-System  
 $X_V(cgs)$  = Volumenssuszeptibilität im cgs-System

- Massensuszeptibilität  $X_{mass}$

Dividiert man die Volumenssuszeptibilität durch die Dichte  $\rho$ , so gelangt man zur Massensuszeptibilität  $X_{mass}$ . Die Einheit für die Massensuszeptibilität ist nun  $m^3/kg$  im SI-System oder  $cm^3/g$  im cgs-System. Auch hier gilt für die Umrechnung das oben Erwähnte.

Gleichung 3  $X_{mass} = X_V/\rho$  wobei:  $X_V$  = Volumenssuszeptibilität,  
 $X_{mass}$  = Massensuszeptibilität,  
 $\rho$  = Dichte

- Molare Suszeptibilität  $X_{mol}$

Die molare Suszeptibilität  $X_{mol}$  unterscheidet sich durch die Verwendung der molaren Masse und wird in  $m^3/mol$  im SI-System oder  $cm^3/mol$  im cgs-System gemessen.

Gleichung 4  $X_{mol} = M \cdot X_{mass} = M \cdot X_V/\rho$  wobei:  $M$  = molare Masse

#### 4. Atomtheoretischer Hintergrund

Die moderne Atomtheorie gibt schließlich Auskunft über die Ursache und die Größe des Paramagnetismus. Die molare Suszeptibilität  $X_{mol}$  errechnet sich für ungepaarte Elektronen nach:

Gleichung 5: 
$$X_{mol} = \mu_S^2 \cdot \frac{\mu_0 \mu_B^2 \cdot N_A}{4 \cdot \pi \cdot 3 \cdot k \cdot T}$$

wobei:  $N_A$  = Avogadro'sche Zahl (6,02214179 · 10<sup>23</sup> mol<sup>-1</sup>)  
 $\mu_B$  = Bohrsches Magneton (9,2740154 · 10<sup>-24</sup> JT<sup>-1</sup>)  
 $\mu_0$  = Permeabilität des Vakuums (1,25664 · 10<sup>-6</sup> NA<sup>-2</sup>)  
 $\mu_S$  = magnetisches Spin-Moment des Stoffes/Ions (dimensionslos)  
 $k$  = Boltzmannkonstante (1,3806504 · 10<sup>-23</sup> JK<sup>-1</sup>)  
 $T$  = absolute Temperatur in K

Zahl der ungepaarten Elektronen	Gesamtspinquantenzahl S [ ]	paramagnetisches Spin-Moment $ \mu_S  = 2 \cdot \sqrt{S \cdot (S + 1)}$ $\mu_S$ [ ]	molare paramagnetische Suszeptibilität (SI-System) (25°C = 298 K) $X_{mol} = \frac{4 \cdot \mu_0 \mu_B^2 \cdot N_A}{4 \cdot \pi \cdot 3 \cdot k \cdot T} \cdot S(S + 1)$ oder $X_{mol} = \mu_S^2 \cdot \frac{\mu_0 \mu_B^2 \cdot N_A}{4 \cdot \pi \cdot 3 \cdot k \cdot T}$ [m <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> ]
1	1/2	1,732	1,259 · 10 <sup>-9</sup>
2	2/2	2,828	3,357 · 10 <sup>-9</sup>
3	3/2	3,873	6,294 · 10 <sup>-9</sup>
4	4/2	4,899	10,071 · 10 <sup>-9</sup>
5	5/2	5,916	14,687 · 10 <sup>-9</sup>

Tabelle 1: Spin-Moment und molare Suszeptibilität in Abhängigkeit von der Anzahl ungepaarter Elektronen.

Die Suszeptibilität X ist demnach ein Maß für die Anzahl an ungepaarten Elektronen. Die Anzahl ungepaarter Elektronen ist abhängig von:

- Element
- Oxidationszahl des Elementes (Wertigkeit)
- Koordinationszahl des Elementes (tetraedrisch, oktaedrisch,...)
- Nachbarschaft des Elementes (Stärke des Ligandenfeldes)

Ungepaarte Elektronen treten vor allem bei den Nebengruppenelementen sowie bei den Lanthaniden und Aktiniden und deren Ionen auf. Diese Ionen sind oft auch für die Färbung der Schmuck- und Edelsteine verantwortlich.

Ion	Ungepaarte Elektronen	Paramagnetisches Spin-Moment $\mu_s$		$\mu_s^2$	Beispiel
		theoretisch	experimentell nach [4]		
Fe <sup>3+</sup>	5	5,916	5,9	35	Magnetit, Demantoit
Mn <sup>2+</sup>	5	5,916	5,9	35	Spessartin
Mn <sup>3+</sup>	4	4,899	4,9	24	Sugilit
Fe <sup>2+</sup>	4	4,899	5,4	24	Almandin
Cr <sup>2+</sup>	4	4,899	4,9	24	
Cr <sup>3+</sup>	3	3,873	3,8	15	Uwarowit
Co <sup>2+</sup>	3	3,973	4,8	15	
V <sup>2+</sup>	3	3,873	3,8	15	
V <sup>3+</sup>	2	2,828	2,8	8	
V <sup>4+</sup>	1	1,732	1,8	3	
Ni <sup>2+</sup>	2	2,828	3,2	8	
Cu <sup>2+</sup>	1	1,732	1,9	3	Türkis
Ti <sup>3+</sup>	1	1,732	1,8	3	
Gd <sup>3+</sup>	7	7,937	8,0	63	GGG
Nd <sup>3+</sup>	3	3,873	3,5	15	NdFeB

Tabelle 2: Theoretische und experimentelle magnetische Momente von in der Gemmologie wichtigen Ionen nach Hoover [4 und 10]

Neben der Anzahl an ungepaarten Elektronen spielt auch der Anteil des Stoffes/Ions im Schmuck- oder Edelsteins eine Rolle. Erweitert man Gleichung 5 um den Massenanteil des betreffenden Stoffes/Ions und der mittleren Molmasse, so erhält man die gewichtete Massenssuszeptibilität  $X_{mass}$  in m<sup>3</sup>/kg:

$$\text{Gleichung 6: } X_{mass} = \frac{\mu_0 \mu_B^2 \cdot N_A \cdot 1000}{4 \cdot \pi \cdot 3 \cdot k \cdot T \cdot M} \cdot \sum (\mu_i^2 \cdot w_i)$$

wobei:  $\mu_i$  = magnetische Spin-Momente der paramagnetischen Komponenten i  
 $w_i$  = Massenanteile der paramagnetischen Komponenten i  
M = mittlere Molmasse

Aus dieser Gleichung geht sehr deutlich hervor, dass der Massenanteil an färbenden paramagnetischen Stoffen/Ionen in allochromatischen Mineralien zu gering sein wird, um eine deutliche Wechselwirkung zwischen einem äußeren Magnetfeld und dem Schmuck- oder Edelstein einfach zu bemerken. Idiochromatisch gefärbte Schmuck- und Edelsteine (auch in Mischungsreihen) sind aber prädestiniert für magnetische Untersuchungen, wie sie noch beschrieben werden.

## 5. Magnete

Für visuelle Tests des magnetischen Verhaltens bedarf es nur eines einfachen Magneten. Im Wesentlichen gibt es vier verschiedenen Typen:

- Eisen-Magnete

Damit meint man einfache Standard-Magnete aus einem Eisenwerkstoff oder einer Ferrit-Zusammensetzung auf der Basis von  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Diese Magnete sind für die folgenden Versuche nicht geeignet, weil ihre magnetische Energie zu gering ist.

- AlNiCo-Magnete

Diese Magnete sind relativ stark und bestehen aus Aluminium, Nickel und Cobalt. Sie sind leider instabil und daher nicht zuverlässig, weil sie zu schnell zur Entmagnetisierung neigen.

- Samarium-Magnete

Dieser Magnet-Typ besteht aus Samarium (Sm) und Cobalt (Co). Sie sind im Verhältnis ihrer nicht allzu hohen magnetischen Energie zu den Kosten für die folgenden Versuche eher ungeeignet.

- Neodym-Magnete

Neodym-Magnete sind sehr starke permanente Magnete mit der Zusammensetzung NdFeB (Neodym-Eisen-Borid). Ihre Anziehungskraft ist bis zu 6,5 mal stärker als einfache Eisen-Magnete. Dadurch ist eine Wechselwirkung mit Edelsteinen viel leichter erkennbar. Die Anziehungskraft eines Magneten ist aber nicht nur von dessen Energieprodukt, sondern auch von seinem Durchmesser abhängig.

Für die folgenden Versuche wurde ein zylindrischer Nd-Magnet, Durchmesser  $\frac{1}{2}$ ", Höhe  $\frac{1}{2}$ " und mit der Bezeichnung N52 der Firma K&J Magnetics [5] verwendet (Abbildung 2).

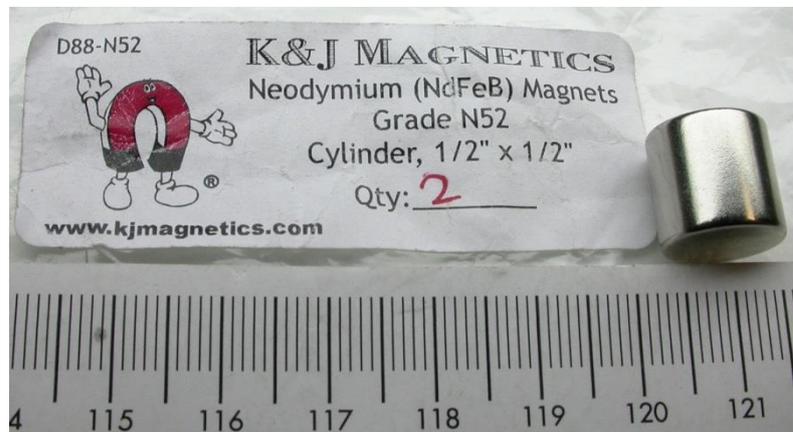


Abbildung 2: Neodym-Magnet der Firma K&J Magnetics

## 6. Untersuchungsmethoden

Für die folgenden Versuche braucht man keine mathematische Formel! Es reicht eine gute visuelle Beobachtungsgabe aus. Es ist daher auch keine exakte Wissenschaft, die Erkenntnisse aus den Beobachtungen reichen aber aus um ungefasste, lose Edelsteine nach ihrem Verhalten, entsprechend ihrer magnetischen Ursachen zu unterscheiden und zu beurteilen. Die Edelsteine können roh oder geschliffen sein. Die für die Versuche verwendeten Edelsteine wiesen ein Gewicht zwischen 0,14 und 69,8 Karat auf. Die Untersuchungen wurden mit drei verschiedenen Methoden durchgeführt und ergaben auch drei verschiedene Empfindlichkeiten, wie sie auch bereits Gumpesberger 2006 zeigen konnte [7]. Die Wahl der Methode hängt einerseits vom Gewicht des Edelsteines und andererseits von der Ursache des Magnetismus (Ionen, Zusammensetzung, Einschlüsse,...) ab.

Ähnlich der Einteilung der Chelsea-Filter-Reaktionen, des Pleochroismus oder der Fluoreszenz in „leuchtend – kräftig – stark – mittel – schwach – inert“, lassen sich auch die Wechselwirkungen mit einem Nd-Magneten unterteilen. Je nach dem Energieprodukt des Magneten (Anziehungskraft) und unabhängig von der gewählten Methode konnte die Wirkung wie folgt beschrieben werden (in Klammer die von Feral (2010) verwendete Nomenklatur [9]):

- **inert** (inert): Keine beobachtbare Anziehung.
- **schwach** (weak): Der Stein bewegt sich/dreht sich geringfügig in Richtung des Magneten.
- **mittel** (moderate): Der Stein bewegt sich/dreht sich in Richtung des Magneten.
- **stark** (strong): Der Stein bewegt sich/dreht sich rasch und deutlich in Richtung des Magneten, bleibt aber nicht haften
- **kräftig** (drags): Der Stein haftet am Magnet, kann aber damit nicht aufgehoben werden
- **haftend** (picks up): Der Stein kann mit dem Magnet aufgehoben werden

- Direkte Methode

Diese Methode wurde bereits von Anderson 1990 [6] und Gumpesberger 2006 [7] beschrieben.

Dazu legt man den zu untersuchenden Edelstein auf eine saubere, flache, glatte Unterlage mit Melamin-Beschichtung oder aus Glas. Man achte darauf, dass keine metallischen Gegenstände in der Nähe sind. Cabochons legt man auf die gewölbte Seite um die Reibung möglichst zu verringern. Nun nähert man sich mit dem Magneten horizontal dem Edelstein und beobachtet die Wechselwirkung mit dem Magneten (Abbildungen 3 bis 5). Diese Methode ist sehr einfach und bedarf keiner Vorbereitung.



Abbildung 3: Direktmethode – der Magnet wird horizontal an die Steine angenähert

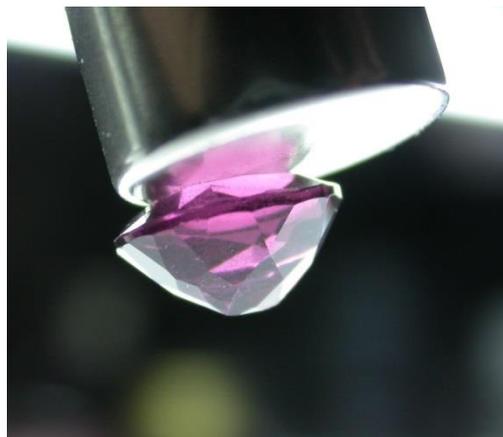


Abbildung 4: Der Granat wird vom Magneten angezogen und bleibt haften



Abbildung 5: Unter Umständen kann auch gefasste Ware überprüft werden

- Pendelmethode

Bei der von Hannemann 1996 [8] und Gumpesberger 2006 [7] beschriebenen Methode klebt man mit Hilfe eines kleinen Stück Klebebandes den Edelstein an einen dünnen, nicht magnetischen Faden. Mit dem anderen Ende hängt man den Faden an einen „Galgen“ (Abbildung 6 und 7). Nun nähert man sich wieder mit dem Magneten horizontal aus verschiedenen Richtungen und beobachtet die Wechselwirkung mit dem Stein. Diese Methode ist etwas aufwändig in der Vorbereitung, dafür aber empfindlicher als die Direktmethode.



Abbildung 6: Die Steine werden mittels Klebebandes und Fadens am Galgen befestigt

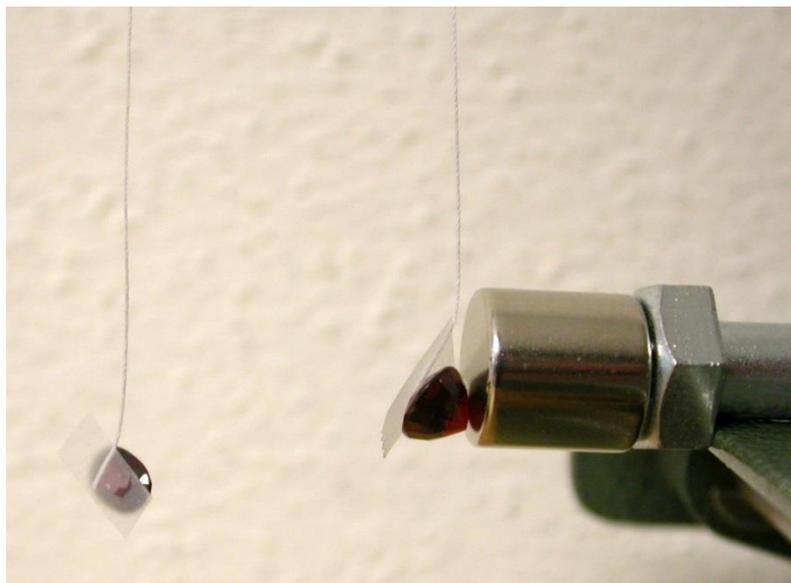
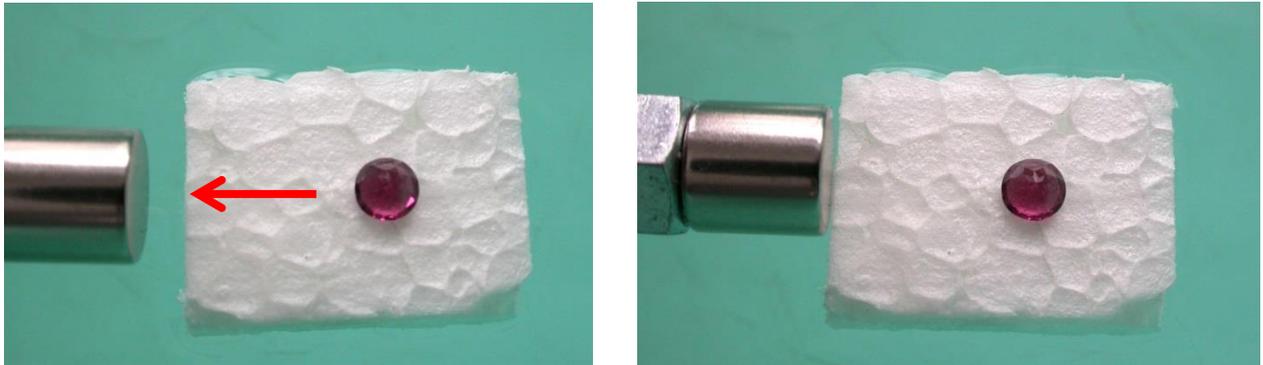


Abbildung 7: Der Granat wird angezogen und bleibt haften, der Spinell rührt sich nicht.

- Schiffchenmethode

Mit dieser Methode haben Hannemann 1996 [8] und Gumpesberger 2006 [7] experimentiert. Man legt das zu untersuchende Objekt auf ein „Schiffchen“ aus Polystyrol (oder Ähnlichem), das in einem Gefäß mit großem Durchmesser stabil schwimmt (bei zu kleinen Durchmessern des Wasserbehälters wird das Schiffchen durch die Oberflächenspannung an den Rand gezogen!). Nun nähert man sich mit dem Magneten wiederum horizontal dem Schiffchen und beobachtet die Wechselwirkung (Abbildungen 8 und 9). Mit dieser Methode war es sogar möglich, den abstoßenden Diamagnetismus von Aluminium nachzuweisen.



Abbildungen 8 und 9: Der Stein schwimmt auf einem „Schiffchen“, während sich der Magnet von der Seite nähert; schließlich wird der Granat samt Schiffchen angezogen.

- Eine weitere Methode wurde von Koivula et.al. 1984 [9] beschrieben, wobei die Wechselwirkung der Edelsteine mit einem Magneten in einer Flüssigkeit ähnlicher Dichte untersucht wurde.
- Genauere Untersuchungen wurden von D.B.Hoover und B.Williams (2007) [4] unter Verwendung einer Waage (auf 0,025 ct bzw. 0,001 ct genau) durchgeführt. Sie verwendeten für ihre Untersuchungen dieselbe Art von Nd-Magneten.

## 7. Magnetisches Verhalten von Diamanten

HPHT-Diamanten werden, wie aus dem Namen bereits hervorgeht, bei hohen Drücken und hohen Temperaturen in einer Schmelze aus Eisen und Kobalt erzeugt. Zurzeit gibt es dafür drei Systeme: das Belt-System, das BARS-System und die Cubic-Press. Sie unterscheiden sich nur in der Geometrie der druckerzeugenden Maschinenteile.

Wesentlich ist jedoch das Verwenden von Eisen und Kobalt als Lösungsmittel für den Graphit. Diese Metalle weisen einen Ferromagnetismus auf und führen dazu, dass durch Rückstände dieser Metalle die so erzeugten synthetischen Diamanten (HPHT-Diamanten) ebenfalls eine große Suszeptibilität aufweisen [11].

Die magnetische Suszeptibilität spielt auch in der Bewertung von Industriediamanten eine gewisse Rolle; so bietet die Firma Vollstädt-Diamant GmbH ein Prüfgerät zur Bestimmung der magnetischen Suszeptibilität von Schleifdiamanten an [12]. Der Gehalt an ferromagnetischen Rückständen aus der Schmelze ist ein Qualitätskriterium für die Festigkeit synthetisch hergestellter Diamanten [13].

Mir persönlich war es nicht möglich an ausreichendes Material für derartige Untersuchungen zu gelangen und kann daher nur auf die Literatur verweisen.

## 8. Ergebnisse

Eine sehr umfangreiche Tabelle mit Ergebnissen findet sich bei Feral [9].

Die Anzahl eigener Ergebnisse ist ständig am Wachsen und es soll hier nur ein Auszug wiedergeben werden. Bezüglich der Einteilung der Wechselwirkung in „inert“ bis „haftend“ haben sich ein Set aus Vergleichssteinen als Vorteil erwiesen. Die Pendelmethode war für Serienuntersuchungen zu aufwändig, sodass im Wesentlichen nur die Direktmethode und die Schiffchenmethode zu Anwendung kamen. Die Direktmethode eignete sich besser für stärkere Wechselwirkungen (stark bis haftend), die Schiffchenmethode für den Nachweis von Diamagnetismus sowie schwache Wechselwirkungen (inert bis stark).

Stein	Masse [ct]	Farbe	Ergebnis	Ursache	Methode
<b>Granate</b>					
Almandin-Spessartin	1,562	orangelich braun	haftend	Fe <sup>2+</sup> /Mn <sup>2+</sup>	Direktmethode
Andradit, Malaia	1,284	hell gelblich braun	haftend	Fe <sup>3+</sup>	Direktmethode
Andradit, Melanit	1,38	schwarz	haftend	Fe <sup>3+</sup>	Direktmethode
Changierender Granat	0,138	bläulich grün// rötlich violett	mittel	allochromatisch Cr <sup>3+</sup> /Fe <sup>3+</sup> ?	Schiffchen
Demantoid	0,37	gelblich grün	haftend	Cr <sup>3+</sup> /Fe <sup>3+</sup>	Direktmethode
Grossular	0,873	grünlich gelb	stark	allochromatisch Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup>	Schiffchen
Grossular, Tsavorit	1,439	schwach gelblich grün	schwach	allochromatisch Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup>	Schiffchen
Hessonit	2,567	gelblich orange	mittel	allochromatisch Fe <sup>3+</sup>	Schiffchen
Hessonit	2,93	schwach grünlich braun	kräftig	allochromatisch Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup>	Direktmethode
Hessonit	1,457	bräunlich orange	stark	allochromatisch Fe <sup>3+</sup>	Schiffchen
Hessonit	2,01	bräunlich orange	stark	allochromatisch Fe <sup>3+</sup>	Schiffchen
Pyrop-Rhodolith	1,494	schwach bräunlich violett	haftend	Fe <sup>2+</sup>	Direktmethode
Rhodolith	2,666	rötlich violett	haftend	Fe <sup>2+</sup>	Direktmethode
Rhodolith	3,553	bräunlich rot	haftend	Fe <sup>2+</sup>	Direktmethode
Rhodolith	2,946	bräunlich violett	haftend	Fe <sup>2+</sup>	Direktmethode
Rhodolith	1,28	rötlich violett	haftend	Fe <sup>2+</sup>	Direktmethode
Spessartin	1,869	bräunlich orange	haftend	Mn <sup>2+</sup>	Direktmethode
Spessartin	1,704	bräunlich orange	haftend	Mn <sup>2+</sup>	Direktmethode
Spessartin	2,213	rötlich braun	haftend	Mn <sup>2+</sup>	Direktmethode
Spessartin	1,04	bräunlich orange	haftend	Mn <sup>2+</sup>	Direktmethode

<b>andere Steine</b>					
Andesin, diffusionsbehandelt	1,435	bräunlich rot - grün	schwach	diff. Cu	Schiffchen
Citrin	15,53	orangelich gelb	inert bzw. dia	---	Schiffchen
Glas	10,21	gräulich blau	inert bzw. dia	---	Schiffchen
Goldorthoklas	3,588	hellgelb	mittel	allochromatisch Fe <sup>3+</sup>	Schiffchen
Kunzit	11,48	schwach rosa	inert bzw. dia	---	Schiffchen
Oregon Sunstone	2,11	bräunlich orange	mittel	nat. Cu	Schiffchen
Rhodochrosit	1,26	schwach bräunlich rosa	haftend	Mn <sup>2+</sup>	Direktmethode
Rosenquarz	9,3	schwach weißlich rosa	inert bzw. dia	---	Schiffchen
Rosenquarz	17,52	schwach weißlich rosa	inert bzw. dia	---	Schiffchen
Rosenquarz	69,78	schwach weißlich rosa	inert bzw. dia	---	Schiffchen
Rubin, Knischka	0,927	rubinrot	schwach	allochromatisch Cr <sup>3+</sup> Tiegelmaterial	Schiffchen
Rubin, Verneuil	3,07	schwach violett rot	schwach	allochromatisch Cr <sup>3+</sup>	Schiffchen
Smaragd hydrothermal	3,19	schwach bläulich grün	schwach	allochromatisch Cr <sup>3+</sup>	Schiffchen
Spinell	0,874	bräunlich violett-rot	schwach	allochromatisch Fe <sup>2+</sup> /Fe <sup>3+</sup> ?	Schiffchen
Turmalin	0,547	schwach grünlich blau	mittel	allochromatisch Fe <sup>2+</sup>	Schiffchen
Zirkon	2,42	violett braun	inert bzw. dia	---	Schiffchen
<b>Legierungen</b>					
Silber 800			inert bzw. dia	---	Schiffchen
Rotgold 750			inert - schwach	---	Schiffchen

Tabelle 3: Ergebnisse eigener Untersuchungen

## 9. Zusammenfassung

Viele der farbgebenden Metall-Ionen in Edel- und Schmucksteinen weisen ungepaarte Elektronen auf. Diese ungepaarten Elektronen sind die Ursache für das magnetische Verhalten. Außer eines fallweise vorhandenen und variierenden Ferromagnetismus, zeigen alle Stoffe ein diamagnetisches und ein paramagnetisches Verhalten. Bei diamagnetischem Verhalten sind keine Ionen mit ungepaarten Elektronen im Stoff enthalten und sie werden von einem starken Magneten abgestoßen. Paramagnetische Stoffe werden von einem starken Magneten angezogen und können sogar am Magneten haften bleiben. Die Stärke der Wechselwirkung eines paramagnetischen Stoffes hängt von der Anzahl ungepaarter Elektronen ab. Diese Ionen können Hauptbestandteil des Edel- oder Schmucksteins sein (idiochromatisch), oder nur die farbgebende Komponente (allochromatisch).

In der Gruppe der Granate haben die reinen Endglieder Pyrop ( $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ) und Grossular ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ) kein paramagnetisches Ion als Hauptbestandteil im Kristall. Eine eventuelle Farbe (z.B. die der Hessonite oder Rhodolithe) ist auf die unbegrenzte Mischkristallbildung mit den anderen Granaten zurückzuführen. Entsprechend ihres geringeren Anteils an paramagnetischen Ionen, ist die Wechselwirkung mit einem starken Magneten geringer. Die Endglieder Andratit ( $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ), Uwarowit ( $\text{Ca}_3\text{Cr}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ), Almandin ( $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ) und Spessartin ( $\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ) weisen jeweils paramagnetische Ionen als Hauptbestandteile auf (**rot** hervorgehoben). Der Paramagnetismus dieser Granate ist so stark, dass die Steine mit der Tafel sogar am Magneten haften bleiben. Durch diese starke Wechselwirkung ergibt sich neben der Dichte und dem Brechungsindex ein zusätzliches Diagnosekriterium für die Lage der Granate in ihren Mischungsreihen.

Da andere ähnlich gefärbte Edelsteine eine meist schwächere Wechselwirkung zeigen, haben wir mit einem starken Magneten ein zusätzliches Instrument in Händen um vor allem rasch Granate aus einem Lot zu separieren.

Als rasche praktikable Methoden haben sich die Direktmethode und die Schiffchenmethode bewährt.

Da viele Edelmetalllegierungen keinen ausgeprägten Paramagnetismus aufweisen, kann diese Methode auch bedingt auf gefasste Steine angewandt werden.

## 10. Literatur und Quellenverzeichnis

- [1] G. Plinii Secundi, Naturalis Historie, Buch 36.
- [2] T. Pradat, J.-P. Gauthier, Revue de Gemmologie AFG 175 p. 14-18, 2011.
- [3] [http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetische\\_Suszeptibilit%C3%A4t](http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetische_Suszeptibilit%C3%A4t)  
(geöffnet 15.02.2013)
- [4] D.B. Hoover, B. Williams, The Australian Gemmologist 23, 146-159, (2007).
- [5] K&J Magnetics, [www.kjmagnetics.com](http://www.kjmagnetics.com), geöffnet 25.03.2013
- [6] B.W. Anderson, Magnetismus in Edelsteinen, Gem Testing, 10. Auflage, Butterworths, (1990).
- [7] S.M. Gumpesberger, Magnetische Trennung von Edelsteinen in Proceedings of the Fourth International Gemological Symposium and GIA Gemological Research Conference, Gems & Gemology 42/3, (2006).
- [8] J.I. Koivula, C.W. Fryer, Identifying Gem-Quality Synthetic Diamonds: An Update, Gems & Gemology, 20/ 3 (1984).
- [9] K. Feral, [http://gemstonemagnetism.com/index\\_coded.html](http://gemstonemagnetism.com/index_coded.html), geöffnet 25.03.2013
- [10] D.B. Hoover et al., Magnetic susceptibility, a better approach to defining garnets, The Journal of Gemmology, 32, 91-103, (2008).
- [11] L. Rössler, Praktische gemmologische Untersuchungsergebnisse an den synthetischen Augenstern-Diamanten, Gemmo News, 24, 5-6, (2009).
- [12] Vollstädt-Diamanten GmbH, <http://www.vdiamant.de/German/DiaSusz.htm>, geöffnet 21.05.2013.
- [13] Persönliche Mitteilung Prof. Dr. Heiner Vollstädt, Mai 2013.

## Kontakt

Dr. Siegfried Schmuck  
Analytisches Labor Schmuck  
Kerschekstraße 9  
A-8076 VASOLDSBERG  
[laborschmuck@aon.at](mailto:laborschmuck@aon.at)  
<http://als.co.at>

## 11. Abbildungsverzeichnis

Alle nicht näher bezeichneten Abbildungen/Fotos wurden vom Autor angefertigt und können unter Angabe des Urhebers verwendet werden.

- [1] Ferromagnetismus - Antiferromagnetismus - Ferrimagnetismus.
- [2] Neodym-Magnet der Firma K&J Magnetics.
- [3] Direktmethode – der Magnet wird horizontal an die Steine angenähert.
- [4] Der Granat wird vom Magneten angezogen und bleibt haften.
- [5] Unter Umständen kann auch gefasste Ware überprüft werden.
- [6] Die Steine werden mittels Klebebandes und Fadens am Galgen befestigt.
- [7] Der Granat wird angezogen und bleibt haften, der Spinell rührt sich nicht.
- [8] Man nähert sich dem Schiffchen mit dem Magnet von der Seite.
- [9] Das Schiffchen mit dem Granat wird in Richtung des Magneten gezogen.